Evolució geomorfològica del sistema dunar de s'Olla (Menorca, Illes Balears)

Miquel MIR-GUAL, José Ángel MARTÍN-PRIETO i Guillem X. PONS

SHNB

SOCIETAT D'HISTÒRIA NATURAL DE LES BALEARS

Mir-Gual, M., Martín-Prieto, J.A. i Pons, G.X. 2016. Evolució geomorfològica del sistema dunar de s'Olla (Menorca, Illes Balears). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 59: 159-177. ISSN 0212-260X. Palma de Mallorca.

S'analitza l'evolució del front dunar (*foredune*), de la vegetació arbòria i dels lòbuls sedimentaris principals (*blowouts*) del sistema dunar de s'Olla (Menorca) al llarg del període 1956-2012. Els resultats obtinguts permeten concloure com la destrucció de la primera línia de dunes és determinant alhora de valorar el comportament geomorfològic del sistema. La sinèrgia entre la desaparició de la *foredune* i la disminució de la superfície vegetada fa que els sistemes siguin molt més actius des del punt de vista sedimentari, incrementant així la vulnerabilitat erosiva de les platges. A més, s'Olla és un exemple paradigma per veure el paper que l'estructura geològica local té envers a la seva evolució sedimentaria. Estudis com aquests aporten arguments empírics i sòlids que poden esdevenir vàlids per a polítiques de gestió i conservació sostenibles per aquests ambients.
Paraules clau: *Menorca, sistema dunar, evolució espai-temps, gestió, conservació, blowout.*

GEOMORPHOLOGICAL EVOLUTION OF THE S'OLLA DUNE SYSTEM (MENORCA, BALEARIC ISLANDS). It is analysed the evolution of dune front (foredune), tree vegetation and the main sedimentary lobes (blowouts) of the dune system of s'Olla (Menorca) over the period 1956-2012. Results obtained allow concluding how the destruction of the first strip of dunes is determinant at the time to analyse the whole geomorphological behaviour of the dune complex. The synergy between the disappearance of the foredune and the decrease of vegetated surface makes these systems much more actives increasing the erosive vulnerability of their beaches. Furthermore, s'Olla is a clear example to see the role that its geological structure has in its sedimentary evolution over the time. Studies like this contribute with empirical data that can help to improve the management tools sustainable for these environments.
Key words*: Menorca, dune system, space-time evolution, management, conservation, blowout.*

Miquel MIR-GUAL, José Ángel MARTÍN-PRIETO i Guillem X. PONS, Grup d'Investigació BIOGEOMED, Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears. Carretera de Valdemossa km 7,5, 07122 Palma: miquel.mir@uib.es.

Recepció del manuscrit: 10-novembre-15; revisió acceptada: 30-desembre-15

Introducció

Els sistemes platja-duna són una de les manifestacions més conegudes en les costes d'acumulació. Al llarg del litoral de les Balears aquests són un dels sistemes més complexos, i a la vegada, més fràgils. Esdevenen ambients on el seu equilibri es

fonamenta en una perfecta simbiosi entre el món biòtic i abiòtic, el món submergit i l'emergit.

Avui dia molts d'aquests sistemes que sofreixen greus problemes d'equilibri i conservació (Nordstrom, 2000). Tanmateix, hi ha hagut tendència a relacionar aquests problemes amb els constants canvis del nivell del mar al llarg del temps, amb especial èmfasi sobre el Plistocè i Holocè, producte de la conjugació de factors físics, climàtics, glacio-eustàtics i de subsidència (Goso, 2006). No obstant, està provat i verificat empíricament que la zona litoral s'adapta de manera constant, rítmica i sincrònica a les situacions esdevingudes pel que fa als canvis del nivell del mar (Brunel i Sabatier, 2009; Aagaard i Sorensen, 2012). No funciona d'igual manera enfront als canvis provocats per la pressió humana.

Des de la meitat del segle XX, amb l'explosió de l'activitat turística a les Illes Balears, especialment a Mallorca, els sistemes dunars litorals han estat els ambients més perjudicats degut a la seva localització en indrets de costes baixes i arenoses, idònies per l'establiment de l'activitat turística i per les seves respectives infraestructures (Roig-Munar *et al*., 2005). Com a conseqüència d'aquestes característiques, l'ocupació del litoral per l'ús d'un turisme de masses ha generat una degradació de les platges a tenir en compte (Rodríguez-Perea *et al*., 2000). En aquest sentit, Mir-Gual *et al*. (2012), deguda la fragilitat d'aquests sistemes, complementada per la gran pressió a la que es veuen sotmesos recurrentment, defineixen alguns punts que, atenent a la seva alta fragilitat, la seva alteració suposa un impacte negatiu, no tan sols a escala local, sinó de manera sinèrgica, podent inclús afectar a la integritat del sistema.

És sabut que en el cas de les Illes Balears hi ha hagut un retrocés generalitzar dels sistemes dunars sedimentaris litorals. Alguns estudis com Mir-Gual *et al*. (2014) han demostrat que aquesta tendència té una important correlació temporal amb l'arribada i explosió de la indústria turística de masses, cap als anys 60 del segle XX. Endemés, els mateixos autors demostren com les zones més erosionades en els fronts dunars d'alguns sistemes (retrocessos de fins a -20 m) estan íntimament relacionades amb les zones de màxima afluència antròpica. Després de dècades i de conèixer la situació actual de molts de sistemes litorals sedimentaris, és important afirmar que tot i que l'activitat turística aporta elevats beneficis econòmics, una mala gestió en aquests ambients genera impactes notablement negatius per a la seva conservació (Roig-Munar *et al*., 2009; McLaughlin *et al*., 2002).

La majoria dels estudis centrats en l'anàlisi de les costes sedimentàries han vessat els seus esforços en estudiar els agents, factors i processos que intervenen en la seva formació (Puig *et al*., 2014; Smyth *et al*., 2013). No obstant existeix manco informació pel que fa al comportament d'aquests sistemes un cop ja formats; és a dir, sobre els seus processos d'erosió i sedimentació o bé, sobre els seus patrons d'evolució. Mir-Gual (2014) obre, en el cas de les Illes Balears, aquesta línia de recerca. A petita escala, i a partir de l'estudi de les morfologies *blowout* existents en diferents sistemes dunars de les Balears, estudia com incideix la dinàmica eòlica en el flux i patrons de transport sedimentari entre la platja alta i el camp de dunes consolidades. Endemés però, i extrapolant aquesta anàlisis a la integritat de diferents sistemes platja-duna, determina distints models d'evolució en escala espacial i temporal.

Amb tot, aquest treball pretén mostrar el model evolutiu que ha seguit el sistema

dunar de s'Olla, localitzat a la costa septentrional de l'illa de Menorca (Fig. 1). A partir d'una anàlisis espacio-temporal duta a terme amb l'aplicació de sistemes d'informació geogràfica es pot veure, atenent a la valoració de distintes variables, com aquest sistema ha anat evolucionant en el transcórrer de les darreres dècades, des de 1956 ençà. Així, el treball intenta relacionar els agents físics i antròpics que han condicionat el comportament geomorfològic d'aquest sistema i els seus processos erosius. El coneixement sobre el comportament d'aquests sistemes des d'una perspectiva temporal ample pot ajudar també a conèixer els seu funcionament i, en conseqüència, a prendre en consideració mesures de gestió òptimes positives pel seu estat de conservació.

Localització i caracterització geogràfica del sistema dunar

El sistema dunar de s'Olla es localitza a la costa septentrional de l'illa de Menorca (Fig. 1). En l'actualitat el sistema es troba notablement alterat a conseqüència dels processos urbanitzadors donats al llarg de les darreres dècades, tot i que encara se'n pot percebre la seva integritat. La superfície que actualment ocupen les morfologies holocèniques i recents, segons Servera (1997), és d'aproximadament 0.24 km^2. El sistema en sí es desenvolupa a partir de la platja que es forma dintre de l'entrada existent entre cap Gros, a la part oriental, i el cap de Galta de sa Bova, a la part occidental. En termes generals, es tracta d'un sistema altament actiu, fet que fa pensar amb el seu alt dinamisme energètic,

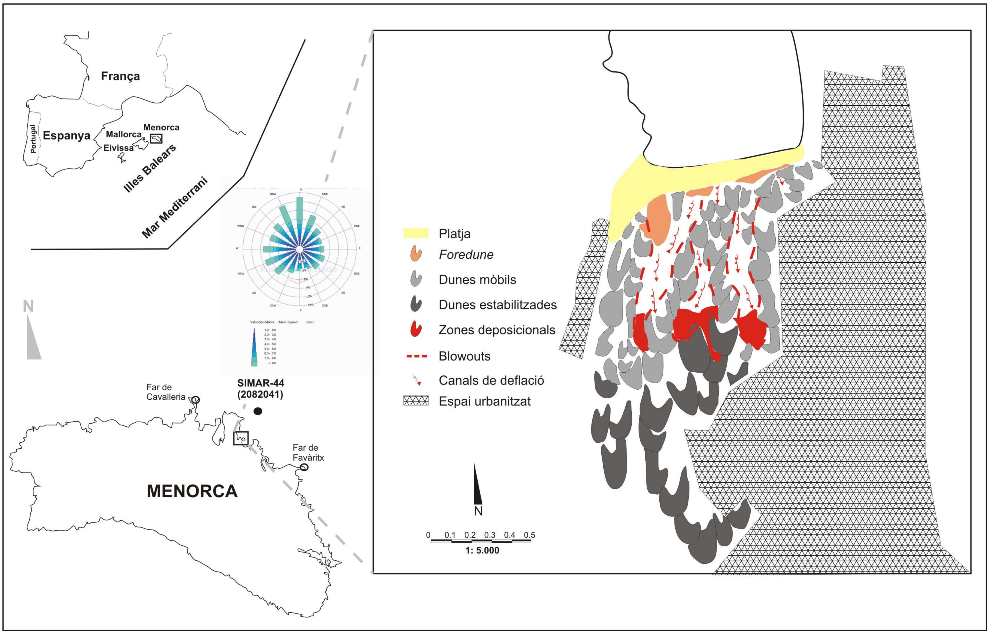


Fig. 1. Localització geogràfica de s'Olla i representació esquemàtica de les característiques geològiques i geomorfològiques. Modificat de Servera (1997).

Fig. 1. *Geographical location of s'Olla and geomorphological sketch of its geological and geomorphological features. Modified of Servera (1997).*

incrementat per la seva obertura als vents de tramuntana. Endemés, la seva disposició respecte a la línia de costa incrementa la canalització del flux eòlic incident, actuant per efecte embut (principi de Bernoulli) sobre el desenvolupament del sistema dunar consolidat terra endins.

Les característiques físiques i dinàmiques del sistema platja-duna de s'Olla fan pensar que el perceptible dinamisme en el seu comportament i evolució dugui associat la importància de conèixer i delimitar quins han estat els patrons evolutius a llarg termini. Des d'una perspectiva general, el sistema dunar de s'Olla, i a diferència dels patrons evolutius de la majoria dels sistemes balears – cordons de dunes paral·lels –, manté una direccionalitat perpendicular a la línia de costa (Fig. 1 i 2). Aquesta tendència es manifesta principalment a partir del desenvolupament terra endins de dos grans lòbuls de deflació o *blowouts* localitzats en cada un dels extrems. L'alt dinamisme energètic i sedimentari en primera línia per una banda, i l'estat de degradació sota el qual s'ha vist el cordó de *foredunes* al llarg dels anys per l'altra, són els dos agents que expliquen la poca superfície avui en dia ocupada per dunes mòbils o semi-estabilitzades – per vegetació –.

Servera (1997) indica que el sistema es desenvolupa terra endins a partir d'una platja d'uns 300 m de llargària, amb una amplada que oscil·la entre els 25-175 m i amb una superfície aproximada als 18.758 m^2. El dinamisme físic associat al sistema fa que les dimensions i cobertures de cada unitat pugui variar substancialment amb el temps. No obstant, les *foredunes*, després de sofrir gairebé una integral desaparició, tenen una cobertura entorn als 925 m^2, alternada amb la presència de morfologies embrionàries tals com *shadow dunes* o *echo dunes*, que s'estendrien al llarg d'uns 3.563 m^2.



Fig. 2. Vista obliqua del sistema dunar de s'Olla – orientada cap al sur –.
Fig. 2. *Oblique view of s'Olla dune system – toward South –.*

Pel que fa a les dunes mòbils aquestes ocuparien una superfície aproximada a les 9.5 ha, estenent-se terra endins fins a uns 450 m de la línia de costa. Finalment, el sector de dunes estabilitzades, segons Servera (1997), és el que més ha patit les conseqüències dels diferents processos urbanitzadors. L'àrea a on encara aquestes morfologies estabilitzades es poden reconèixer ocupa una superfície aproximada a les 13 ha. Tal i com postulen Martín-Prieto i Rodríguez-Perea (1996) i Levin *et al*. (2008), la vegetació és una de les variables que millor indica l'estat de conservació en els sistemes platja-duna. En el cas de s'Olla, la diversitat d'espècies vegetals herbàcies és menor que en altres sistemes dunars de Menorca, inclús sent visible la seva absència en alguns sectors del front dunar fins les actuacions dutes a terme a partir de 2002 (Fraga i Martín-Prieto, 2012).

Materials i mètodes

Per tal de mesurar sistemàticament les variacions en els canvis de la primera línia de duna i de la cobertura vegetal arbòria al sistema platja-duna de s'Olla al llarg del període 1956-2012 s'ha seguit una metodologia desenvolupada a partir de la utilització conjunta de cartografia a escala 1:5.000 amb fotografies aèries verticals, ja que constitueixen el document més utilitzat per el càlcul de les taxes d'erosió/acreció litoral (Ojeda, 2000; Vizcaino, 2001). Per a tal fi s'han pres com a referència vuit fotogrames compresos entre els anys 1956 i 2012.

La digitalització dels fotogrames verticals s'ha dut a terme a través de la restitució fotogramètrica mitjançant un SIG (Sistema d'Informació Geogràfica) la qual permet la correcció geomètrica de les imatges aèries que presenten errors degut a la distorsió panoràmica, obliqüitat, altitud i perspectiva, així com les deformacions inherents a la perspectiva cònica fotogràfica. Les imatges han estat rectificades a través del software ArcGIS^{TM}, el qual adapta les imatges a un sistema de coordenades homogeni. La correcció geomètrica de la imatge ens permet poder traslladar les seves dades a una altra imatge a la qual es pot donar la projecció desitjada – en el nostre cas una projecció UTM –. Una vegada traslladades totes les fotografies al mateix sistema de coordenades (ETRS 1989 31N), la metodologia utilitzada, basada amb de l'eina *Digital Shoreline Analysis System* (Thieler *et al*., 2009), ens ha permès l'estudi comparatiu dels canvis en les diferents línies de costa i duna, permetent alhora establir-se les respectives comparacions des de la perspectiva temporal i espacial.

Resultats

Evolució del front dunar (1956-2012)

Si es quantifica l'evolució i el comportament del front de dunes de s'Olla des de 1956 fins a l'actualitat es veu com aquest ha estat controlat pels processos erosius existents, traduïts al llarg del temps amb un retrocés generalitzat de la primera línia de duna, tot i que amb algunes puntualitzacions, al transcórrer dels darrers anys.

En termes generals el front dunar de s'Olla, al llarg del període 1956-2012, ha sofert un retrocés mitjà de 33.48 m, amb una taxa de -0.6 m/any (Taula 1). Des del punt de vista espacial el comportament erosiu del sistema en qüestió ha estat gairebé generalitzat. Els patrons evolutius de la primera línia de dunes s'han vist afectats per l'erosió, arribant a retrocessos

	1956-1979	**1956-1989**	**1956-2002**	**1956-2006**	**1956-2008**	**1956-2012**
Retrocés absolut (m)	-47,97	-35,09	-32,24	-35,20	-36,14	-33,48
EPR (m/any)	-2,10	-1,09	-0,70	-0,70	-0,69	-0,60

Taula 1. Taxes de retrocés acumulat en el front dunar de s'Olla entre el període 1956-2012 – les dades sempre prenen com a referència la situació de 1956 –.
Table 1*. Accumulated rates patterns along the dune front of s'Olla over the period 1956-2012 (data take as reference the situation of 1956).*

de fins a -43 m (acumulats entre 1956-2012) (Fig. 3A). No obstant aquesta tendència queda manifesta sobretot el sector oriental de la platja, i amb un punt d'inflexió marcat el 2002 (Fig. 3B).

La diferència entre la situació mostrada pel sector oriental i occidental a la Fig. 3 respon principalment a la situació inicial de 1956. En aquest any no existia línia de *foredune* al sector occidental, esdevenint aquesta la part més dinàmica del sistema, controlada per processos de deflació sedimentària des de la platja alta cap a l'interior. No obstant, sí existia front dunar al sector oriental. A partir de 2002 es començaren a aplicar mesures de gestió enfocades a la recuperació geomorfològica de la primera línia (Roig-Munar *et al.*, 2007) revertint positivament al llarg de tota la platja (Fig. 3B). Aquest fet suposà una certa recuperació del sector oriental, que fins al moment havia estat controlat per un important retrocés, arribant a màxims de creixement de 45 m (2002-2012). D'altra banda, ajudaren a la formació i desenvolupament d'una primera línia de duna al sector occidental, inexistent fins al moment, i amb màxims de creixement i desenvolupament de fins a 33 m.

Temporalment, si bé la tendència general ha estat marcada pel retrocés del front dunar, aquesta s'ha donat amb diferents intensitats. Cap apuntar algunes apreciacions sorgides a partir del 2002, punt d'inflexió vers a l'estat de conservació de la primera línia de s'Olla. En termes acumulatius, des de la situació inicial de 1956, la tendència va ser notablemente negativa en tant a la situació de la primera línia de duna i del seu estat de conservació, amb una tendència de retrocés manifesta en cada un dels períodes analitzats (Fig. 4). No obstant, si l'anàlisi es limita al període entre 2002-2012 (panell inferior de la Fig. 4) es pot observar com hi ha un canvi de tendència notablement considerable, inclús manifestat per l'acreció sedimentària i recuperació de la *foredune*. Aquest canvi de tendència queda palès quantitativament a la Taula 2, a on es postula com un moment d'inflexió el qual canvia la tendència de retrocés soferta pel sistema fins al moment. De fet, si s'analitza el basculament del front de dunes per períodes es veu com en el primer, 1956-1979, s'experimenta el màxim retrocés, amb -47.97 m i una taxa de -2.10 m/any. Si bé els propers, 1979-1989 i 1989-2002, disminueixen lleugerament la tendència inicial, encara experimenten retrocessos que apunten a la degradació del front dunar, amb -35.09 m i -1.09 m/any, i 32.24 m i 0.7 m/any respectivament. Atenent a dites xifres doncs, la tendència entre el període 1956-2002 és notablement negativa vers a l'estat de conservació de la *foredune* a s'Olla, experimentant un retrocés més que considerable.

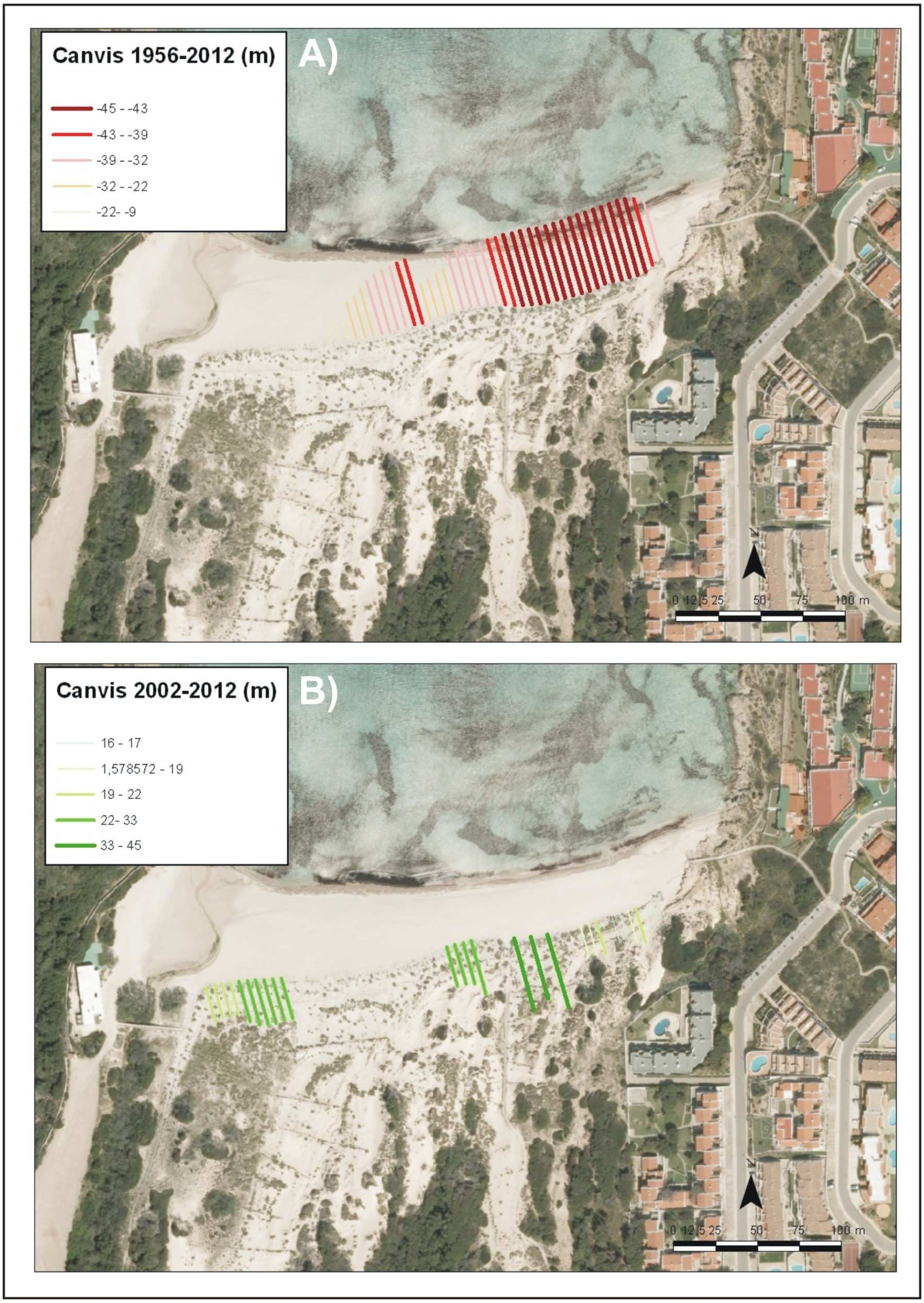


Fig. 3. Evolució del front dunar de s'Olla entre 1956-2012 i 2002-2012. Cartografia de 2012.
Fig. 3. *Evolution of the front dune of between 1956-2012 and 2002-2012. The aerial photography belongs to 2012.*

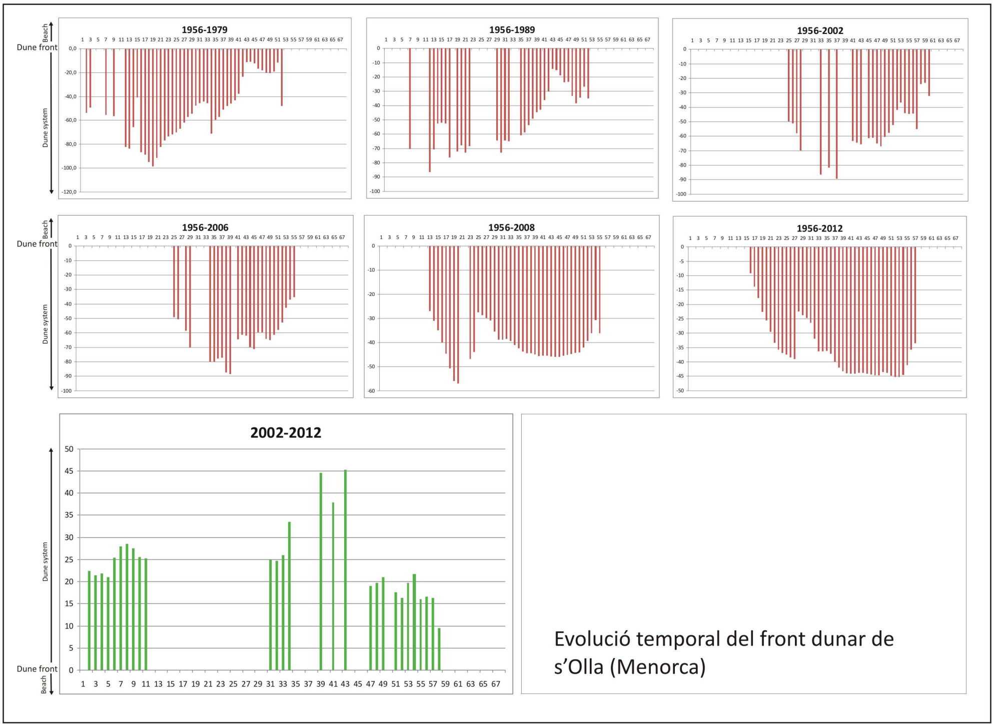


Fig. 4. Evolució espacio-temporal del front dunar de s'Olla per períodes, sempre partint de la situació inicial de 1956.
Fig. 4. *Space-time evolution of the dune front of s'Olla by periods, always departing of 1956's situation.*

No obstant, i com s'esmentava anteriorment, la situació sofreix una certa millora a partir d'aquest moment. Si bé és cert que el còmput final queda marcat per una tendència erosiva del sistema (panell superior Fig. 4), a partir de 2002 la tendència canvia, inclús donant signes de recuperació i acreció sedimentària en alguns sectors de la platja. Dita recuperació es mostra també a la Taula 2, a on es pot apreciar com entre 2002 i 2012 la tendència general passa a ser – tot i que de manera molt tímida – positiva. El període 2002-2006 és el primer que mostra el canvi, amb

	1956-1979	1979-1989	1989-2002	2002-2006	2006-2008	2008-2012
Retrocés absolut (m)	-47,97	-12,88	-19,36	0,02	0,94	0,96
EPR (m/any)	-2,10	-0,9	-1,2	0	0,01	0,02

Taula 2. Evolució del front dunar de s'Olla per períodes.
Table 2. *Evolution of the dune front of s'Olla by periods.*

un creixement mitjà de 0.02 m. Aquesta tendència es reafirma i consolida als períodes posteriors, concretament entre 2006-2008 amb un creixement del 0.94 m i una taxa de 0.01 m/any, i entre 2008-2008, amb un creixement de 0.96 m i una taxa de 0.02 m/any.

Variació de la cobertura vegetal arbòria (1956-2012)

Si s'observa la Taula 3 i la Fig. 5A s'aprecia una reducció lleugera i sostinguda en el temps vers a la superfície de la vegetació arbòria en la seva primera línia. En termes absoluts la màxima cobertura arbòria al sistema dunar de s'Olla – al llarg del període estudiat – es troba al 1956 – situació pre-turística – amb un total de 78.774 m^2, mentre que la mínima és compartida pels anys 2006 i 2008, amb 60.924 m^2 respectivament.

L'anàlisi que millor reflexa la seva evolució és la que es pugui fer del comportament i la tendència de la cobertura arbòria per períodes (panell dret de la Taula 3 i Fig. 5B). Si bé és cert que el còmput general del període total analitzat segueix essent negatiu, es mostren alguns punts de creixement vers a la cobertura vegetal, o si més no almanco, d'estabilització. Clarament hi ha una reducció significativa al llarg dels dos primers períodes, entre 1956-1989, amb una pèrdua total – si sumem els dos períodes per separat – de 17.478 m^2. No obstant la tendència es comença a invertir des de 1989, començant amb un lleuger increment fixat en 1.302 m^2. Finalment, i si bé és cert que en el període 2002-2006 es torna a experimentar una tímida reducció amb -1.674 m^2, des de llavors fins a l'actualitat es dóna una tendència d'estabilització, finalitzant amb un creixement de 1.476 m^2 en el període 2008-2012.

Any	Superfície vegetada (m^2)	Període	Superfície vegetada (m^2)
1956	78774	1956-1979	-10721
1979	68053	1979-1989	-6757
1989	61296	1989-2002	1302
2002	62598	2002-2006	-1674
2006	60924	2006-2008	0
2008	60924	2008-2012	1476
2012	62400		

Taula 3. Evolució de la superfície de vegetació arbòria al sistema de s'Olla. A l'esquerra es distingeixen les respectives superfícies per a cada un dels anys analitzats, mentre que a la dreta es fa el respectiu pels diferents períodes temporals analitzats.

Table 3. *Evolution of the vegetated surface in the dune system of s'Olla. The left panel shows the vegetated area by each of the sampling years whilst on the right panel are shown the vegetated area by period.*

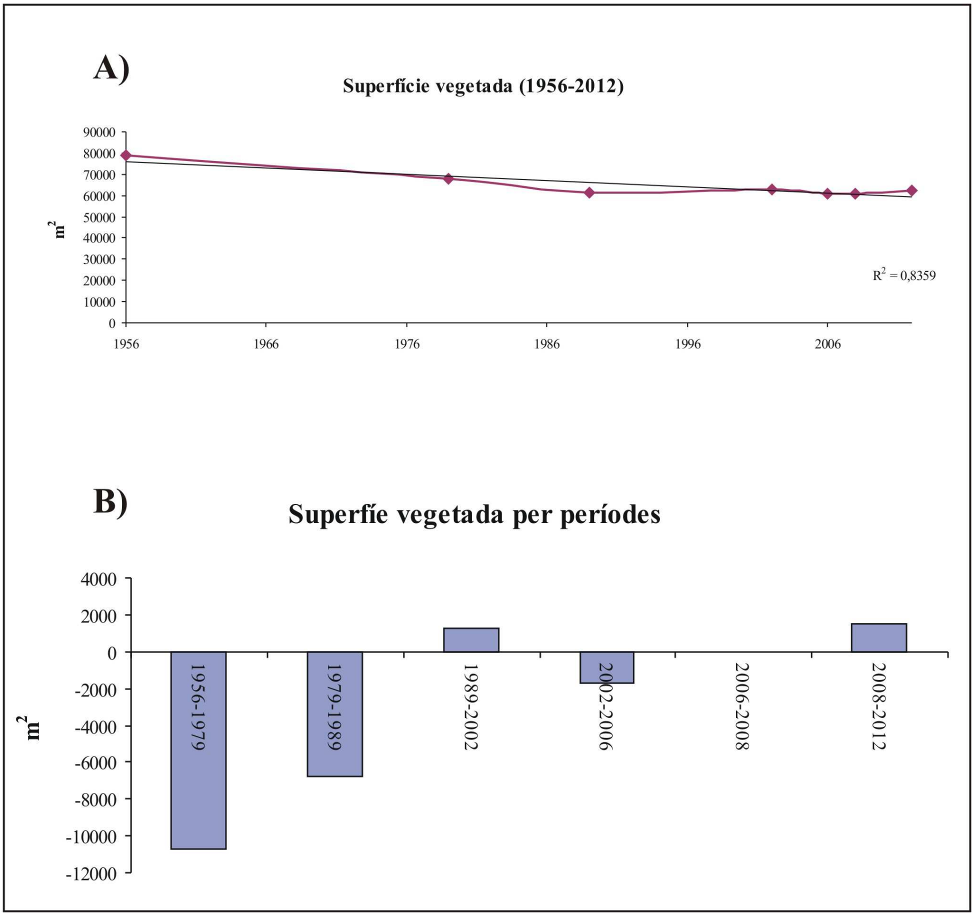


Fig. 5. Evolució espai-temps de la superfície vegetada al sistema de s'Olla. A la part superior (A) es mostra l'evolució considerant cada un dels anys analitzats entre el període 1956-2012, mentre que a la part inferior (B) es fa el propi considerant-la en períodes temporals determinats. Ambdues gràfiques es relacionen amb la Taula 3.

Fig. 5. *Space-time evolution of the vegetated surface in the dune system of s'Olla. On the upper panel (A) is shown the evolution considering each of the years analysed over the period 1956-2012, whilst on the lower panel (B) is shown the evolution by period. Both graphs are linked to Table 3.*

Després de la tendència negativa acumulada i de decreixement de la superfície arbòria en el sistema de s'Olla, cap fer èmfasi al procés d'estabilització i recuperació donat, sobretot, a partir de 2002. Recordant el que apuntàvem en epígrafs anteriors, les mesures de gestió aplicades vers a la recuperació geomorfològica i ecològica del front dunar han donat una certa estabilització del sistema, suposant per tant una menor dinàmica eòlica i sedimentària des de la platja alta cap al seu interior. Aquesta estabilització ha tengut efectes principalment en l'explosió colonitzadora de vegetació herbàcia, sobretot en la

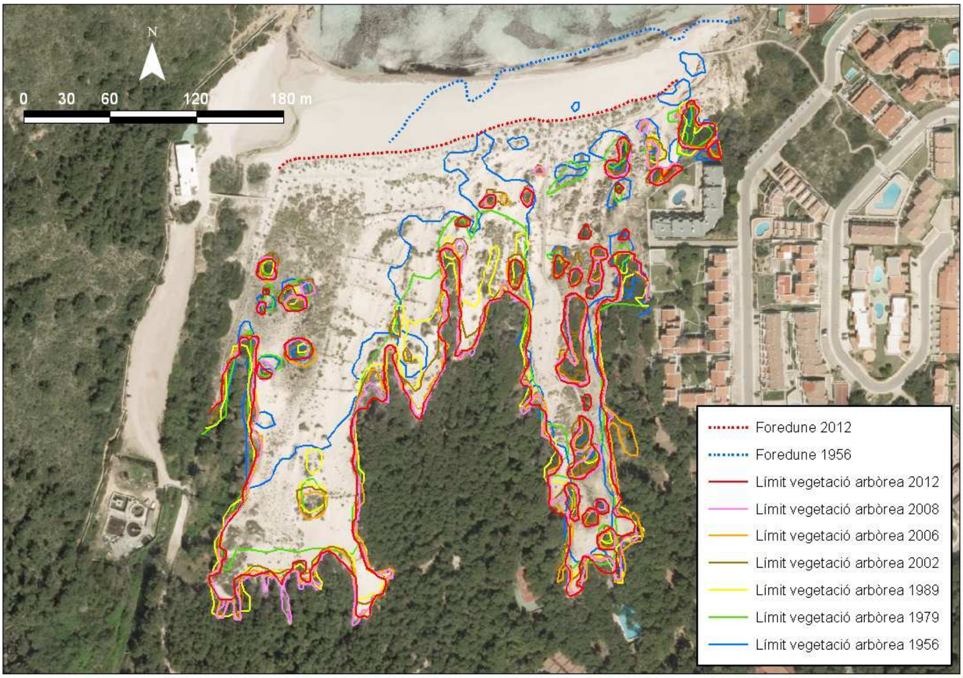


Fig. 6. Límits i evolució de la vegetació arbòria al sistema dunar de s'Olla.
Fig. 6. *Limits and evolution of the vegetated surface in the dune system of s'Olla.*

foredune i el cordó de dunes mòbils. No obstant, també ha facilitat el creixement d'individus aïllats d'espècies arbustives-arbòries que poc a poc van apareixent, també, al sector més mòbil del sistema. Amb aquest escenari destacar dos factors importants; en primer lloc apuntar el notable retrocés de la línia de vegetació arbòria marcada entre 1956 (línia blava) i 1979 (línia verda), mentre que en segon instància apuntar al creixement d'individus aïllats arbori-arbustius a la zona més mòbil del sistema, tal i com apunta la situació marcada al 2012 (línia vermella) (Fig. 6).

*Evolució dels lòbuls de deflació (*blowouts*)*

A la Fig. 7 s'aprecien dues situacions a esmentar; en primer lloc destacar el notable avanç sofert pels lòbuls entre 1956 (línia blava) i 1979 (línia verda) (Fig. 7A). Aquest avanç s'aprecia fonamentalment al lòbul occidental, mentre que l'oriental es manté molt més estable. Si aquesta tendència es relaciona amb el comportament del front dunar es pot observar com la zona sense presència de *foredune* en dit període és la que esdevé més activa, i per tant, la que facilita un major avanç del lòbul de cap a l'interior, establint-ne una correlació espacial totalment positiva. Endemés, temporalment també hi ha una forta relació. El període 1956-1979, moment de major avanç del lòbul occidental, coincideix també amb el moment de major retrocés de la *foredune*, fixat amb -47.97 m i una taxa de -2.10 m/any (Taula 2). Aquest binomi es repetix entre 1979-1989. Si la Fig. 7A

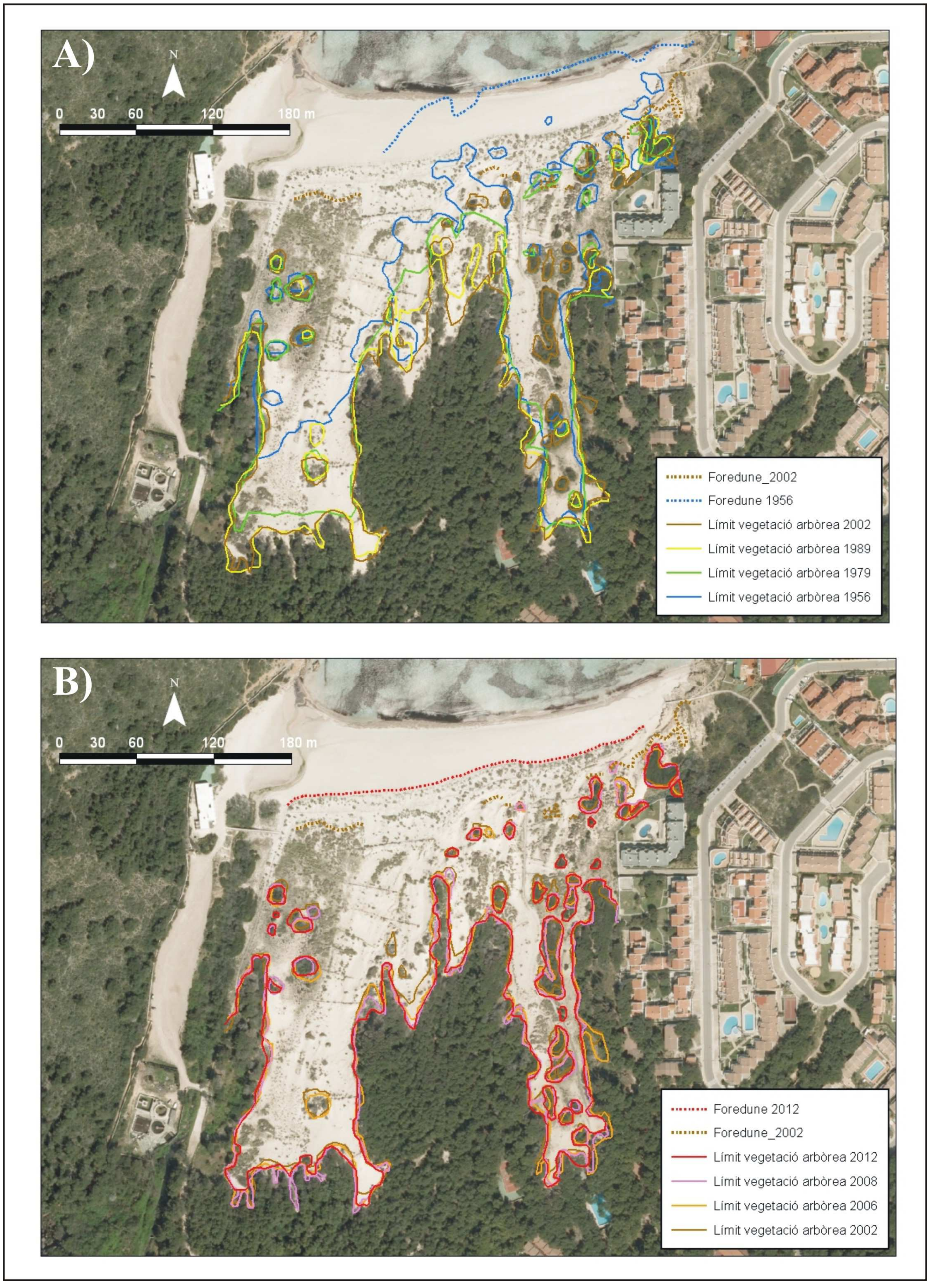


Fig. 7. Evolució del lòbuls a s'Olla a partir de la línia marcada per la vegetació arbòria; A) situació evolutiva entre 1956-2002, B) situació evolutiva entre 2002-2012.

Fig. 7*. Evolution of sand lobes in s'Olla from the line drawn by tree vegetation; A) evolutive trend between 1956-2012, B) evolutive trend between 2002-2012.*

mostra com hi torna haver una pulsació important vers a l'avanç del lòbul occidental, el retrocés de la *foredune* en aquest cas es fixa en -12.8 m i una taxa de -0.9 m/any.

En segon lloc, i ja centrant l'anàlisi a la Fig. 7B, es veu, a l'igual que succeïa amb l'estabilització del front dunar i de la cobertura vegetal arbòria, que a partir de 2002 es produeix una disminució vers a l'avanç dels dos lòbuls, especialment de l'occidental. Aquest escenari no és diferent si es torna comparar amb l'estat de conservació del front dunar. La recuperació de la primera línia de duna iniciada al 2002 a conseqüències de les mesures de gestió aplicades suposà una estabilització progressiva del sistema suposant; en primer lloc una disminució de la dinàmica eòlica i sedimentària a conseqüència d'un increment de rugositat i resistència en primera línia, i en segon lloc facilitant la recuperació i repoblació natural de vegetació principalment herbàcia, però també arbustiva i arbòria.

Discussió

La disposició i evolució del sistema de s'Olla dibuixa un escenari marcat per la presència de dos gran lòbuls sedimentaris que s'endinsen terra endins des de la part superior de la platja emergida (Fig. 2). La seva estructura morfològica i el seu funcionament dinàmic, tot i que en una escala diferent, es podria relacionar amb les morfologies *blowout*. Aquesta afirmació ve arrel de les manifestacions d'autors com Glenn (1979), Carter *et al*. (1990), Hesp (2002) o Mir-Gual (2014) els quals postulen que els lòbuls de deposició sedimentaria, normalment existents a la part més interior, també formen part del *blowout* en el seu conjunt, generant doncs una diferenciació entre una àrea d'erosió, una de transport i una de deposició.

Si bé és cert que l'estudi de les formes *blowout* en sistemes sedimentaris litorals s'ha incrementat al llarg de les darreres dècades, aquest ha estat en la seva gran majoria des d'una perspectiva individualitzada. No obstant, avui encara en manca informació de les conseqüències que de la seva formació i desenvolupament en poden derivar en tant a l'equilibri i estat de conservació de tot el sistema dunar associat. Alguns autors, de passada i de manera subtil, n'han fet alguna referència al respecte. Hugenholtz i Wolfe (2009) suggereixen que els *blowouts* – entesos com a morfologia – esdevenen els precursors a l'hora d'entendre la dinàmica de les dunes, i que en conseqüència, un increment en l'estudi de la dinàmica eòlica i sedimentària en *blowouts* ajudarà a entendre millor els processos de reactivació en dunes estabilitzades o semi estabilitzades. D'aquesta manera, els autors deixen entreveure que el desenvolupament de morfologies erosives no s'ha de considerar, tampoc, com un fet aïllat dins el funcionament integral del sistema a on es desenvolupen, sinó que els seus efectes sinèrgics poden tenir conseqüències considerables per a la integritat del mateix. Bate i Ferguson (1996) apunten que la formació de *blowouts* facilita l'entrada de vent dins del camp de dunes posterior. Així doncs, si es considera el vent com un del principals agents modalitzadors en sistemes sedimentaris litorals, cal entendre que aquest fet tindrà conseqüències en el devenir del camp de dunes existent a la part posterior dels *blowouts* en formació. L'existència d'aquestes plataformes erosives – com a conductes canalitzadors –, ajudades de l'existència de vents efectius des del punt de vista sedimentari – entesos com l'agent mecànic responsable –,

facilitaran aports d'arena "fresca" de cap l'interior del sistema (van Boxel *et al.*, 1997), fet que el reactivarà i en suposarà canvis geomorfològics a tenir en compte. Tal i com esmenten Gares i Nordstrom (1995) aquests processos han estat observats per altres autors tals com Cooper (1958) i Wiedemann (1990) en sistemes d'Oregon i Washington als EEUU respectivament, o Barrere (1992) a França.

Amb el dit cap pensar en trobar els motius que, en el cas de s'Olla, han facilitat la formació i el desenvolupament de les dues morfologies *blowout* existents (Fig. 2) i en conseqüència, el patró geomorfològic evolutiu de tot el camp de dunes. Partint de les anàlisis realitzades i dels resultats obtinguts tres en serien els processos que, de forma individual i sinèrgica, han generat l'escenari actual. El primer procés a destacar passa per l'evolució de la primera línia de duna el qual ha estat controlat clarament per processos erosius. Tal i com reflecteixen les Fig. 3 i 4 aquest s'ha vist notablement caracteritzat per un retrocés generalitzat expressat en un moviment mitjà de 33.48 m terra endins en el període 1956-2012, suposant una taxa de -0.6 m/any (Taula 1). Prenent en consideració el que demostren autors com Mir-Gual *et al.* (2015) l'absència d'una primera línia de duna ben desenvolupada (*foredune*) potencia la incidència eòlica sobre el camp de dunes i incrementa els patrons de transport sedimentari des de la platja emergida cap a l'interior, podent generar una increment en la vulnerabilitat erosiva de les platges.

El segon procés a destacar passa per la variació en la cobertura vegetal la qual, en el mateix període de mostreig, ha experimentat una lleugera però sostinguda reducció expressada en -16.374 m^2 (Taula 3 i Fig. 5 i 6). Tal i com manifesta Pethick (2001) la vegetació té un paper clau pel que fa a la caracterització dels camps de dunes, bé ajudant a retenir el sediment i fomentar la formació de morfologies incipients, o bé com a element fixador del substrat arenós. És així que una disminució de la cobertura vegetal suposa un increment de l'exposició d'arena lliure que podrà ser erosionada i transportada pel vent.

Finalment, el tercer procés que en destaca és l'evolució geomorfològica de s'Olla pel comportament dels dos grans lòbuls sedimentaris existents, els quals han mostrat una tendència d'avanç generalitzat, sobretot en el període 1956-1979, tot coincidint amb el període de major retrocés de la *foredune* (Fig. 7A). Destacar també l'estabilització d'aquest avanç a partir de 2002, ara en consonància amb l'estabilització també experimentada en el front dunar i en la disminució de la cobertura vegetal (Fig. 7B).

L'alt dinamisme i fragilitat que caracteritza els sistemes de dunes litorals fa que una gran quantitat d'agents i processos en siguin els responsables de la seva formació i evolució. No obstant, és cabdal també considerar les sinèrgies que sovint es donen. En el cas de s'Olla la destrucció generalitzada de la primera línia de duna, principalment al llarg del període 1956-1979, va suposar una reactivació sedimentària del sistema i, en conseqüència, un increment en tant als patrons erosius des de la platja alta cap a l'interior. Una de les conseqüències d'aquesta reactivació sedimentaria, demostrada per autors com Barchyn i Hugenholtz (2012), passa per un efecte negatiu en el desenvolupament de la vegetació deguda la inestabilitat sedimentària. Aquesta tendència queda palesa també en el cas de s'Olla ja que, com s'ha demostrat, la tendència de la vegetació analitzada ha estat a disminuir.

És així que la destrucció i degradació de

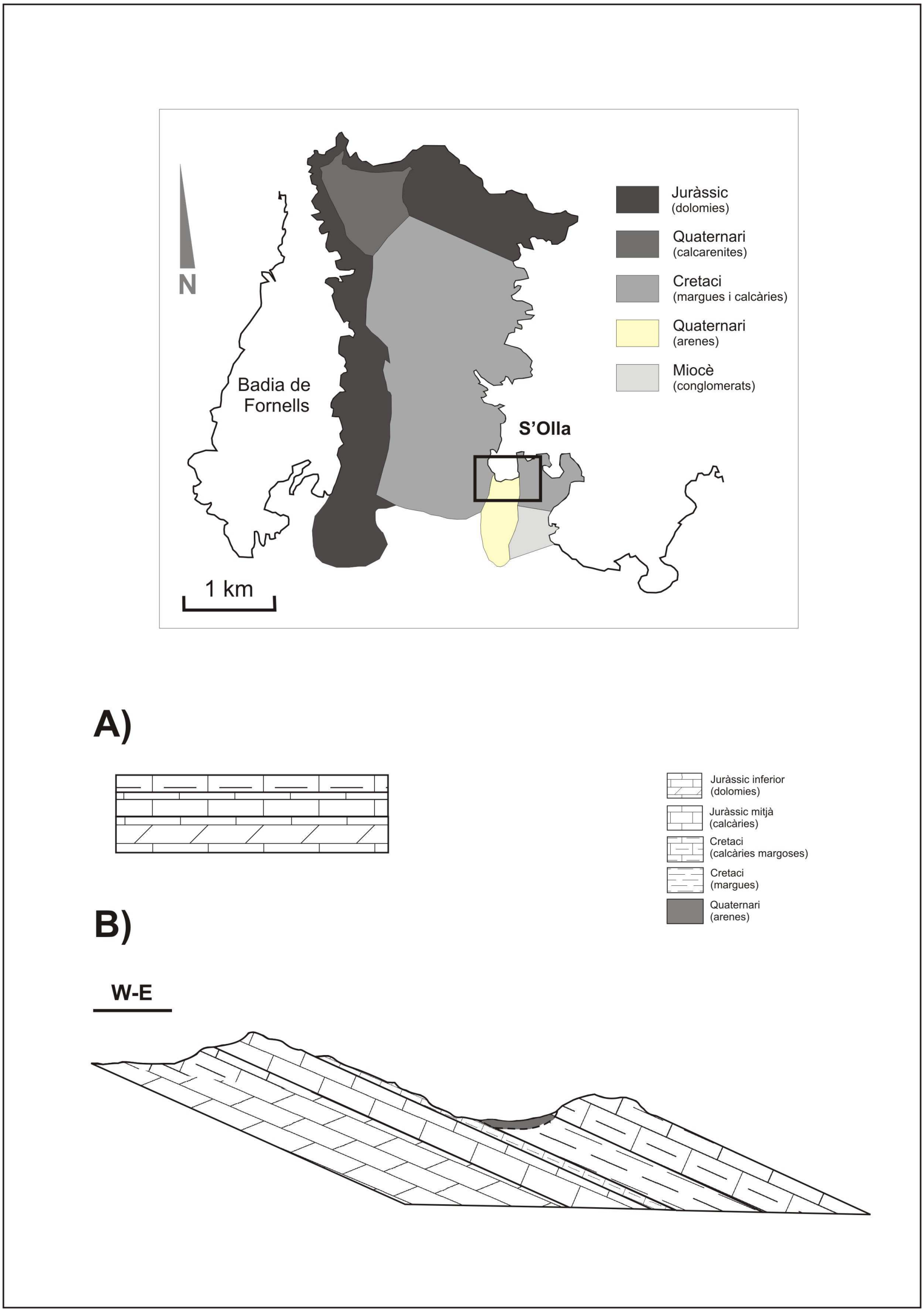


Fig. 8. Esquema (sense escala) de la disposició estructural de s'Olla (Menorca).
Fig. 8. *Scheme (not scaled) of the structural disposition of s'Olla (Menorca).*

la primera línia de duna en aquest cas va suposar una reactivació sedimentaria del sistema dunar associat la qual ha tingut a la llarg dos elements que han esdevingut claus pel seu desenvolupament geomorfològic. En primera instància ha suposat un handicap en tant a la colonització de vegetació psammòfila, eliminant així la seva funció de retenció i estabilització sedimentària. La suma dels dos processos, lligada a les altes condicions energètiques – per vent – que tant caracteritzen la costa nord de Menorca, han fet que el sistema dunar en la seva integritat, a partir de la formació de dos gran *blowouts*, s'hagi desenvolupat de la manera que es presenta avui dia.

Influència del control estructural sobre el desenvolupament del sistema

El sistema dunar de s'Olla es postula com un exemple vers a la influència que el control estructural del terreny pot tenir en tant al desenvolupament del sistema dunar. Si bé l'anàlisi espai-temps (1956-2012) dut a terme i explicat en els epígrafs anteriors ja ens postula alguns agents claus pel que fa al comportament d'aquest sistema dunar al llarg de les darreres dècades; e.g. estat de conservació del front dunar, grau de cobertura de vegetació arbòria, etc., la projecció del cos de dunes perpendicular a la línia de costa convida a pensar, també, amb la influència que altres agents i factors poden tenir vers al seu comportament. Es dóna per suposada l'existència dels agents físics bàsics per a la formació del sistema de dunes, com són; a) existència de sediment, b) el vent com agent energètic, i c) un espai d'acomodació. No obstant, el desenvolupament que segueix el camp de dunes en aquest cas, perpendicular a la línia de costa que l'alimenta, es postula notablement diferent al patró que segueixen la majoria dels sistemes de dunes a les Illes Balears. En aquest sentit doncs, les condicions estructurals locals es presenten de nou com l'explicació que pot ajudar a entendre tals circumstàncies.

Des del punt de vista geològic es tracta d'una sèrie monoclinal de materials del Juràssic – dolomies – i del Cretaci – margues i calcàries – que cabussen uns 30º cap a l'E (Fig. 8). La vall associada a la cala, responent de nou a processos d'erosió diferencial, es situa a sobre dels materials més margosos del Cretaci – més fàcilment erosionables – presentant una direcció N-S que torna a coincidir amb la direcció que presenten les capes (Mir-Gual, 2014). D'aquesta manera, l'espai d'acomodació, a on el material sedimentari és depositat, queda de nou condicionat per les condicions estructurals locals, fet que permet respondre alhora a la direcció i desenvolupament del sistema dunar terra endins, perpendicular a la línia de costa ja mencionada.

La quantitat de sediment per una banda, i l'efecte energètic dels vents principals per l'altra, es tornen a establir com el denominador comú compartit amb la resta dels sistemes insulars. No obstant, com a fet diferencial i a l'igual que altres sistemes com el cas de Cala Mesquida (Mallorca), el control estructural és el que determina la fisonomia de l'espai d'acomodació i per extensió, el particular desenvolupament del sistema de dunes associat.

Conclusions

El sistema dunar de s'Olla (Menorca) presenta unes característiques geomorfològiques que, pel que respecte els seus patrons d'evolució espacio-temporals, contemplen notables diferències amb el perfil estàndard dels sistemes platja-duna a les Illes Balears. El seu desenvolupament

terra endins, perpendicular a la línia de costa, fa que esdevingui un escenari divergent al model comú que aquests ambients presenten arreu de l'arxipèlag. El resultats obtinguts en aquest treball permeten explicar el perquè d'aquest realitat atribuint com a responsables tres factors principals. En primer lloc destacar la tendència regressiva que ha caracteritzat el comportament de la primera línia de duna des de 1956 ençà. El fet de que els processos erosius hagin imperat en el front d'aquest sistema ha suposat una notable desestabilització –arribant en alguns indrets a la seva desaparició– de la *foredune*. En segona instància val a destacar el comportament regressiu que ha sofert, també, la cobertura vegetal al llarg del mateix període d'estudi, disminuint el paper fixador que té la vegetació en tant al sediment. La conseqüència directa derivada de la sinèrgia d'aquests dos processos rau en una reactivació sedimentària del sistema platja-duna ja que, sota una major incidència eòlica i sense l'efecte dissuasiu de la *foredune* i la seva vegetació associada, els mecanismes de transport sedimentari entre la platja alta i l'interior del sistema dunar han incrementat. El resultat visible d'aquest escenari queda manifestat per l'avanç que els dos lòbuls principals han sofert de 1956 ençà. Si bé la dinàmica física del sistema, amb alternança dels processos erosius i deposicionals descrits, explica en bona part el seu desenvolupament geomorfològic, no cal oblidar el paper que l'estructura geològica circumdant ha tingut, també, alhora de condicionar el seu estat. La topografia derivada, en forma de cubeta perpendicular a la línia de costa, ha permès que l'espai d'acomodació hagi canalitzar la deposició sedimentària i el desenvolupament del camp de dunes consolidades terra endins.

Aquest treball permet concloure que l'estat de conservació de la primera línia de duna és essencial per a mantenir un equilibri sedimentari òptim en tot el sistema platja-duna, i que qualsevol episodi erosiu a la *foredune* pot tenir sinèrgies negatives en tant a un increment de l'erosió a la platja emergida i a una reactivació sedimentària del camp de dunes consolidades. A més posa de manifest el paper i la importància que l'estructura circumdant té en tant a l'evolució i caracterització geomorfològica del sistema.

Bibliografia

Aagaard, T. i Sorensen, P. 2012. Coastal profile response to sea level rise: a process-based approach. *Earth Surf. Process. Landforms*, 37: 354–362.

Barchyn, T. E. i Hugenholtz, C.H. 2012. A new tool for modeling dune field evolution based on an accessible, GUI version of the Wermer dune model. *Geomorphology*, 138: 415-419.

Barrere, P. 1992. Dynamics and management of the coastal dunes of Landes, Gascony, France. In: Carter, R.W. i Curtis, T.G. (eds.). *Coastal dunes: geomorphology, ecology and management for conservation*. Balkema. Rotterdam. 25-32.

Bate, G. i Ferguson, M. 1996. Blowouts in coastal foredunes. *Landscape and Urban Planning*, 34: 215-224.

Brunel, C i Sabatier, F. 2009. Potential influence of sea-level rise in controlling shoreline position on the French Mediterranean Coast. *Geomorphology*, 107: 47-57.

Carter, R. W., Hesp, P. i Nordstrom, K.F. 1990. Erosional landforms i coastal dunes. In: Nordstrom, K.F., Psuty, N.P. i Carter, R.W. (eds.). *Coastal dunes: form and processes*. John Wiley. London**.** 217-249.

Cooper, W. S. 1958. Coastal sand dunes of Oregon and Washington. Geological Society *of America*, 72: 169-183.

Fraga, P. i Martín-Prieto, J.A., 2012. La vegetación en la gestión de las playas de

Menorca. In: Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Mir-Gual, M. y Cabrera, J.A. (eds.). *La gestión integrada de playas y dunas: experiencias en Latinoamérica y Europa*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 19: 375-392.

Gares, P. A. i Nordstrom, K.F. 1995. A cyclic model of foredune blowout evolution for a leeward coast: Island Beach, New Jersey. *Annals of the Associtation of American Geographers*, 85 (1): 1-20.

Glenn, M. 1979. Glossary. In: McKee, E. (ed.). *A study of global sand seas.* US Geological Surveys Professional Paper. Washington, 1052**.** 399-407.

Goso, C. 2006. Aspectos sedimentológicos y estratigráficos de los depósitos cuaternarios de la costa platense del departamento de canelones, Uruguay. *Latin american journal of sedimentology and basin analysis*, 13 (1): 77-89.

Hesp, P. 2002. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 48: 245-268.

Hugenholtz, C. H. i Wolfe, S.A. 2009. Form-flow interactions of an aeolian saucer blowout. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 919-928.

Levin, N., Kidron, G.J. i Ben-Dor, E. 2008. A field quantificaction of coastal dune perennial plants as indicators of surface stability, erosion or deposition. *Sedimentology*, 55: 751-772.

Martín-Prieto, J.A. i Rodríguez Perea, A. 1996. Participación vegetal en la construcción de los sistemas dunares litorales de Mallorca. In: Grandal d'Anglade, A. i Pagés Valcarlos, J. (eds.). *IV Reunión de Gemorfología*. Sociedad Española de Geomorfología. O Castro (Coruña): 785-799.

McLaughlin, S., McKenna, J. i Cooper, J.A. (2002). Socio-economic data in coastal vulnerability indices: contraents and opportunities. *Journal of Coastal Research*, SI36: 487-497.

Mir-Gual, M. 2014. *Anàlisis, caracterització i dinàmica de les formes erosives blowout en sistemes dunars de Mallorca i Menorca (Illes Balears)*. Tesi Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. Palma. 423 pp.

Mir-Gual, M., Roig-Munar, F.X., Pons, G.X., Martín-Prieto, J.A. i Rodríguez-Perea, A. 2012. Modelo teórico para la definición de curvas de sensibilidad litorales. Comparativa entre los sistemas playa-duna mediterráneos y caribeños. In: González-Díez (ed.). *Avances de la Geomorfología en España 2010-2012. Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología*. Universidad de Cantabria**.** Santander. 375-378.

Mir-Gual, M., Pons, G.X., Gelabert, B., Martín-Prieto, J.A, i Rodríguez-Perea, A. 2014. Conservation approach of a front dune system through the study of its blowouts (Cala Agulla, Mallorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 57: 79-103.

Mir-Gual, M., Pons, G.X., Delgado-Fernández, I., Gelabert, B., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A. 2015. La importancia de la primera línea de duna para el estado de conservación de los sistemas de dunas costeras. *Geo-Temas*, 15: 41-44.

Nordstrom KF. 2000. *Beaches and dunes of developed coasts*. Cambridge University Press. 343 pp.

Ojeda, J. 2000. Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de la A.G.E*, 30: 103-118.

Pethick, J. 2001. *An introduction to Coastal Geomorphology*. Edward Arnold Publishers. United States.

Puig, M., Del Río, L., Plomaritis, T.A. i Benavente, J. 2014. Influence of storms on coastal retreat in SW Spain. *Journal of Coastal Research*, SI70: 193-198.

Rodríguez-Perea, A., Servera, J. i Martín-Prieto, J.A. 2000. *Alternatives a la dependència de les platges de les Balears de la regenaració artifificial continuada: informe Metadona*. Universitat de les Illes Balears. Palma de Mallorca. 108 pp.

Roig-Munar, F.X. i Martín-Prieto, J.A 2005. Evolución de la línea de costa y foredunes en el sistema playa-duna de s'Olla (Menorca). In: Blanco, R., López, J. i Pérez, A. (dds.) Procesos geomorfológicos y evolución costera. *Actas II Reunión de*

Geomorfología Litoral. Universidad de Santiago de Compostela. 183-200.

Roig Munar, F X, Rodríguez-Perea, A., Martín Prieto, J. A. i Pons, G. X. 2007. The restoration of the dune system of s'Olla (Menorca, Balearic Islands) as an example of the use and application of soft and passive measures of administration. *International Conference on Management and Restoration of Coastal Dunes*. Santander. 126-128.

Roig-Munar, F. X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A. i Pons, G.X. 2009. Soft management of beach-dune systems as a tool for their sustainability. *Journal of Coastal Research*, SI56: 1284-1288.

Servera, J. 1997. *Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears*. Tesi doctoral, 2 vols. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. Inèdita. 904 pp.

Smyth, T. A. G., Jackson, D.W.T. i Cooper, J.A.G. 2013. Three dimensional airflow patterns within a coastal blowout during fresh breeze to hurricane force winds. *Aeolian Research*, 9: 111-123.

Thieler, E. R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L. i Ergul, A. 2009. *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0. An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S.* Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

van Boxel, J.H., Jungerius, P.D., Kieffer, N. I Hampele, N. 1997. Ecological effects of reactivation of artificially stabilized blowout in coastal dunes. *Journal of Coastal Conservation*, 3: 57-62.

Vizcaino, A. 2001) *Erosión costera en Almeria (1957-1995)*. Instituto de estudios almerienses. Almería.